

触覚感性計測用センサシステムの開発

著者	田中 由浩
号	50
学位授与番号	3639
URL	http://hdl.handle.net/10097/37307

氏 名	た な か よ し ひ ろ
授 与 学 位	田 中 由 浩
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成18年3月24日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) バイオロボティクス専攻
指 導 教 員	触覚感性計測用センサシステムの開発
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 小菅 一弘
	主査 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 横堀 壽光
	教授 長南 征二 東北大学助教授 田中 真美
	(秋田県立大学)

論 文 内 容 要 旨

本論文は、ヒトが知覚する種々の触覚感性量を計測する、PVDF (Polyvinylidene Fluoride) フィルムを受感材に用いた能動触覚センサシステムを提案するものである。本論文は全5章から成る。以下に各章の要旨を示す。

第1章 序論

触覚センサ・能動センシング・感性計測の研究の意義、背景を中心に、本論文の概要を示した。

ヒトは日常生活の中でいろいろなものに触れ、触覚を通じ精密な把持や操作を実現し生活を送っている。特に、対象物との接触を知覚するだけに限らず、指や手のひらを能動的に動かし、触る・撫でるといった動作を行うことによって、対象物の質感や手触り感などの感性量も知覚している。このように触覚は視覚や聴覚と共にヒトの生活において必要不可欠な感覚である。

近年、触覚センサについて数多くの研究が行われている。しかしながら、開発されている触覚センサの大部分は力や変位などの力学的物理量を計測するものである。ヒトの触覚感性量を計測するセンサおよび評価方法についての研究は未だ十分に行われていない。触覚感性量が重要な評価要素となる対象物を考えると布が挙げられる。布は柔軟かつ変形しやすい物体であり、モデル化や測定が困難である。布の触感の特性評価は職業熟練者の用いる「風合い」という用語で判断されている。風合いは布の硬軟性、弾性、粘性、目の粗さなどの総合評価を意味するが、概念が極めて曖昧であるため、評価が非常に難しい。現在一般に用いられている布の特性を評価するシステムとしては KES が挙げられる。これは布の引っ張り・せん断・曲げ・圧縮・表面摩擦特性などの物理情報を測定し、これらの測定結果の重みづけ合成値を用いて風合い評価を試みるものである。しかしながら、未だこれらの評価値と風合いとの間に十分な対応は確認されていない。

PVDF フィルムは高分子圧電材料の一種であり、薄く柔軟で成形加工が容易である。また、その出力電圧特性はヒトの皮膚感覚受容器の一つであるパチニ小体の出力特性と類似していることが知られている。田中らはこれらの点に着目し、PVDF フィルムを用いた触覚センサとロボット指を統合した能動センシングシステムを開発した。センサで対象物表面をなぞることにより PVDF フィルムから得られた出力信号が主要な数種の触覚感性量と対応関係を有することを明らかにしている。しかしながら、田中らのセンサシステムは圧電効果を利用するものであり、センサによる温冷感情報の取得については検討されていない。ヒトの皮膚は機械的刺激や温度刺激を検出することができ、我々は対象物に対し指や手のひらを能動的に動かし、欲しい情報に応じた動作を行うことによって、これらの刺激を得て振動感や温冷感などの様々な手触り感を知覚している。したがって、ヒトの触覚感性計測を実現するためには、触感に関与する振動および温度の情報を収集することが必要不可欠であるといえる。一方、PVDF フィルムは圧電効果と同時に焦電効果も有しており、温度変化に対しても電圧を発生する。これより、PVDF フィルムをセンサ受感材として用いることで温冷感に関する情報収集が可

能であると考えられる。さらに、圧電と焦電の両効果を利用することで、単一のセンサによる振動感および温冷感の情報収集が実現され、種々の触覚感性量の定量評価や総合評価が可能となると考えられる。

以上に鑑み、本論文はヒトが知覚する種々の触覚感性量を計測する、PVDF フィルムを用いた能動触覚センサシステムを提案するものである。対象物として柔軟で取り扱いが困難な布を用いる。始めに、PVDF フィルムの焦電効果利用による温冷感計測について検討する。PVDF フィルムの焦電効果を利用したセンサシステムを製作し、センサ出力とヒトの温冷感との比較を通じ、その有効性を示す。続いて、本研究において製作した焦電効果を利用したセンサおよび田中の圧電効果を利用したセンサを基に、圧電効果と焦電効果を利用した手触り感計測用能動触覚センサシステムの製作を行う。センサシステムは PVDF フィルムを用いたセンサおよびヒトの触動作を考慮した能動センシング駆動機構から構成される。センサ出力とヒトの手触り感との関係について考察し、振動感および温冷感の情報取得の可能性を示す。さらに、手触り感に関する様々な種類の触覚感性量について官能評価を行い、製作した手触り感計測用能動触覚センサシステムを用いて触覚感性計測を試み、その有効性を示す。

第2章 温冷感計測用センサシステムの開発

PVDF フィルムの焦電効果を利用したセンサシステムを製作し、温冷感計測の有効性について検討を行った。

始めに、計測試料として用いる6種類の布について温冷感の官能評価を行った。さらに、センシング動作設計のために、ヒトの温冷感評価時の動作に関して調査を行った。調査の結果、ヒトが手のひらで触って温冷感を評価する際に対象物に与える接触圧力は上昇後一定の値を保持する傾向にあることがわかった。さらに、どの試料においても一定となった際の圧力値および立ち上がり時間には差が無く、接触圧力の変化の軌道はほぼ同じであることがわかった。

続いて、ヒトの温冷感識別原理を基に、PVDF フィルムの焦電効果を利用したセンサシステムを製作した。センサ表面を一定温度に加熱・温度制御し対象物と接触させることにより、PVDF フィルムに生じた熱の変動による出力信号を検出することができる。センサの温度制御にはセンサ表面温度と実験環境温度を利用し、実験環境温度に PVDF フィルムからの出力信号が影響を受けない温度制御方法を提案した。対象物との接触動作には、ヒトの温冷感評価時の動作に関する調査結果に基づいた接触圧力の軌道制御を用いることを提案した。さらに、得られた出力波形からローパスフィルタ処理を行い、圧電効果による成分を除去し、焦電効果による出力成分を抽出する方法を提案した。

温冷感の官能評価を行った布について、製作したセンサシステムによる計測実験を行った。その結果、計測実験により得られた焦電効果による出力信号のピーク値はヒトの温冷感と対応関係を有することが確認された。

以上の結果より、PVDF フィルムの焦電効果を利用したセンサシステムが温冷感計測に有効であることが明らかになった。

第3章 手触り感計測用能動触覚センサシステムの開発

圧電効果と焦電効果を利用した手触り感計測用能動触覚センサシステムの製作を行った。センサシステムは PVDF フィルムを用いたセンサおよびヒトの触動作を考慮した能動センシング駆動機構から構成される。数種の布について計測実験を行い、製作したセンサシステムによる振動感および温冷感の情報取得の可能性について検討を行った。

始めに、製作したセンサシステムによる計測結果の考察のための準備として、6種類の布についてヒトの触覚による判別試験を行った。

続いて、第2章で製作した焦電効果を利用したセンサおよび田中の圧電効果を利用したセンサを基に、手触り感計測用能動触覚センサシステムを製作した。センサは母材に弾性体を用いて、表面に PVDF フィルムを貼り付けた構造とした。さらに、センサ表面を加熱・温度制御可能な構造とした。本センサをロボットフィンガ先端に装着し、ロボットフィンガ基底を X 軸スライダに取り付けた。センサ表面を一定温度に加熱し、振動感および温冷感計測用にそれぞれ異なるセンシング動作を提案した。温冷感計測のために、始めにセンサを対象物に接触させる動作を行い焦電効果による出力信号を検出する。振動感計測のために、続いてセンサで対象物表面をなぞる動作を行い圧電効果による出力信号を検出する。それぞれのセンシング動作について検討し、得られる出力データから信号処理を通し特徴量を求め、評価に用いるセンサ

出力として提案した。センサを接触させる実験により得られた焦電効果による出力信号からはピーク値を求め、温冷感評価に用いるセンサ出力として提案した。センサでなぞる実験により得られた圧電効果による出力信号からは、20～100Hz のパワースペクトル密度の総和および 100～500Hz のパワースペクトル密度の分布比を求め、それぞれ振動感評価に用いるセンサ出力として提案した。

ヒトの触覚による判別試験を行った布に対して、製作したセンサシステムによる計測実験を行い、手触り感とセンサ出力の関係について考察した。その結果、得られたセンサ出力結果はヒトの触覚による判別試験の結果と似た傾向を有しており、センサ出力が手触り感と関連性を有することが確認された。

以上の結果より、製作した手触り感計測用能動触覚センサシステムによる振動感および温冷感の情報取得の可能性が明らかになった。

第4章 触覚感性計測

様々な種類の触覚感性量について官能評価を行い、第3章で製作した手触り感計測用能動触覚センサシステムを用いて触覚感性計測を試み、その有効性について検討を行った。

6種類の布および7種類の布をそれぞれ検討に用いる試料群として用意し、それぞれの試料群に対して、手触り感に関する様々な触覚感性量について官能評価を行った。さらに、得られた結果に対して因子分析を行い、布の触感を表現する上で支配的な因子となる感性量について検討を行った。その結果、どちらの試料群についても同様の傾向を持つ結果が得られ、布の触感に支配的な感性量は、しっとり感、ふんわり感、温冷感であることが明らかになった。これらの感性量を評価可能とすることで布の触感を表現することができると考えられる。

第3章で製作された手触り感計測用能動触覚センサシステムを用いた触覚感性量評価について検討を行った。比較に用いる触覚感性量には、因子分析の結果に基づき求めたしっとり感、ふんわり感、温冷感の官能評価値を用いた。その結果、センサで対象物表面をなぞる実験により得られるセンサ出力のうち、20～100Hz のパワースペクトル密度の総和はしっとり感と、100～500Hz のパワースペクトル密度の分布比はふんわり感とそれぞれ強い対応関係を持つことが確認された。温冷感評価については、センサを対象物に接触させる実験により得られる焦電効果による出力信号について再度検討し、センサ接触 2 秒後の PVDF フィルムに誘起した電圧値を新たに評価に用いるセンサ出力として提案した。その結果、これまで温冷感との対応関係が確認されていたセンサ出力（焦電効果による出力信号のピーク値）よりも新たに提案したセンサ出力（センサ接触 2 秒後の PVDF フィルムに誘起した電圧値）の方が温冷感とより良好な対応関係を持つことが確認された。以上の結果から、計測実験により得られる複数のセンサ出力がそれぞれ特定の布の触感に支配的な感性量、しっとり感、ふんわり感、温冷感の評価に有効であることが明らかになった。

さらに、センサ出力による感性量の総合評価に関して検討を行った。官能評価結果を用いて重回帰分析を行い、しっとり感、ふんわり感、温冷感と「肌触りが良い」との関係式を求めた。この関係式に、センサ出力から求めたしっとり感、ふんわり感、温冷感の推定値を適用し、センサ出力から「肌触りが良い」の評価値推定を試みた。その結果、センサ出力による推定値と「肌触りが良い」の官能評価値との間に概ね良好な対応関係が確認された。「肌触りが良い」の評価に関わる個人差の影響は未解決であるが、年齢層を変えた官能評価結果についてもセンサ出力による推定値は概ね良好な対応関係を有していた。以上より、センサ出力を用いることにより、一般的な肌触りの総合評価が可能であることが確認された。

以上の結果より、開発したセンサシステムが触覚感性量の評価に有効であることが明らかになった。

第5章 結論

本研究で得られた結果を総括し、今後の展望について述べた。

論文審査結果の要旨

触覚はヒトにとって重要な機能であり、その機能を工学的に実現しようと、触覚センサに関して数多くの研究が行われているが、これまで開発されているセンサは、滑り、力、温度など、物理量の計測を目的としたものがほとんどで、ヒトの触覚感性量を計測するセンサや、それを直接評価する方法についての研究はほとんど行われていない。本論文は、布の「風合い」を定量的に評価することを目的として、PVDF フィルムを用いた能動触覚センサシステムを提案するもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、PVDF フィルムの焦電効果を利用した温冷感計測センサシステムを提案している。このセンサシステムは、ヒトが布の温冷感官能評価を行う際の、温冷感識別原理を基にして開発されたもので、ある温度に加熱された PVDF フィルムセンサが布と接触する際に得られる出力信号から、その熱変動に依存する成分を抽出することによって、その布の温冷感の評価を行おうとするものであり、ヒトによる布の官能評価結果と、開発されたセンサによる計測結果を比較し、その有効性を示している。これは有用な成果である。

第 3 章では、PVDF フィルムの圧電効果と焦電効果を利用した、手触り感計測用能動触覚センサシステムを提案している。提案しているシステムは、前章で開発したセンサと、ヒトのような触動作を実現する能動センシング機構から構成されており、異なるセンシング動作を用いることで、触動作の際に得られる振動感と、2 章で提案した温冷感の計測を同時に行うものである。また、実験を行い、得られたセンサ出力とヒトの手触り感との関係について考察し、開発したセンサにより振動感および温冷感の評価が可能なことを示している。開発されたシステムは、布の官能評価を可能にする独創的かつ実用的なシステムである。

第 4 章では、第 3 章で開発した手触り感計測用能動触覚センシングシステムを用いて、触覚感性計測を行い、その有効性について検討している。具体的には、代表的な特性を持つ 6 種類と 7 種類の 2 群の布を用い、人間による官能評価を調査し、支配的な因子について解析を行い、この結果と計測によって得られる結果が良く対応していることを示している。さらに、官能評価結果と測定結果を用いた重回帰分析によってセンサ出力による手触り感の定式化を行い、一般的な人間の手触り感の総合評価が可能である事を明らかにしている。これは画期的な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、触覚感性に強く関わる触覚の振動感および温冷感を計測するセンサを開発するとともに、これらを統合したシステムを構築、その有効性を明らかにしたもので、機械工学およびバイオメカトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。